

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2002-267845
 (43)Date of publication of application : 18.09.2002

(51)Int.CI. G02B 5/30
 G01J 3/14
 G02B 6/12
 G02B 6/293
 G02B 27/28

(21)Application number : 2001-071830 (71)Applicant : NIPPON SHEET GLASS CO LTD

(22)Date of filing : 14.03.2001 (72)Inventor : KIKKO SHIGEO

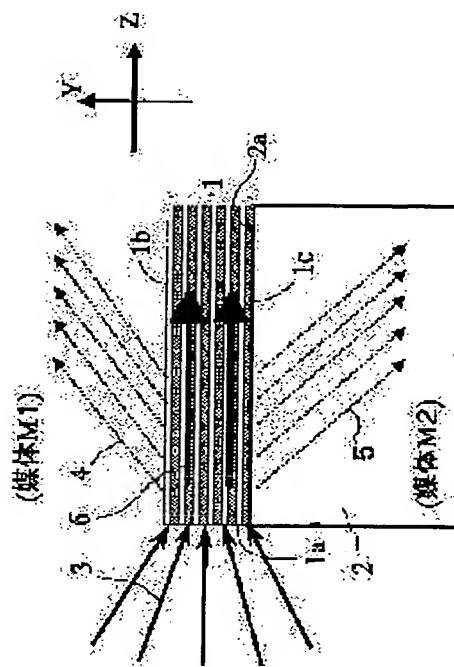
NARA MASATOSHI
 NAKAZAWA TATSUHIRO
 KOYAMA TADASHI
 ASAI TAKAHIRO

(54) OPTICAL ELEMENT AND SPECTROSCOPE UNIT AND POLARIZED LIGHT SEPARATING DEVICE USING THE SAME

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To solve the problem that an optical demultiplexer has to be made large-sized in order to improve the performance of the optical demultiplexer in which a diffraction grating is used because of the small wavelength dependency of emission angle from the diffraction grating.

SOLUTION: In an optical element, the end face thereof nearly vertical to a layer face of a periodical multilayer structure which is deemed as a one-dimensional photonic crystal, is used as a light incident face and the surface which is in parallel with the layer face is used as a light emissive face, an affinitas band other than a lowest subsequence of the photonic crystal corresponding to a used wavelength λ_0 is utilized.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

(19)日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2002-267845

(P2002-267845A)

(43)公開日 平成14年9月18日 (2002.9.18)

(51)Int.Cl.⁷

G 0 2 B 5/30
G 0 1 J 3/14
G 0 2 B 6/12
6/293
27/28

識別記号

F I

G 0 2 B 5/30
G 0 1 J 3/14
G 0 2 B 27/28
6/12

テ-マコ-ト(参考)

2 G 0 2 0
2 H 0 4 7
Z 2 H 0 4 9
Z 2 H 0 9 9
N

審査請求 未請求 請求項の数12 O.L (全 15 頁) 最終頁に続く

(21)出願番号

特願2001-71830(P2001-71830)

(22)出願日

平成13年3月14日 (2001.3.14)

(71)出願人 000004008

日本板硝子株式会社

大阪府大阪市中央区北浜四丁目7番28号

(72)発明者 橋高 重雄

大阪府大阪市中央区北浜四丁目7番28号

日本板硝子株式会社内

(72)発明者 奈良 正俊

大阪府大阪市中央区北浜四丁目7番28号

日本板硝子株式会社内

(74)代理人 100069084

弁理士 大野 精市

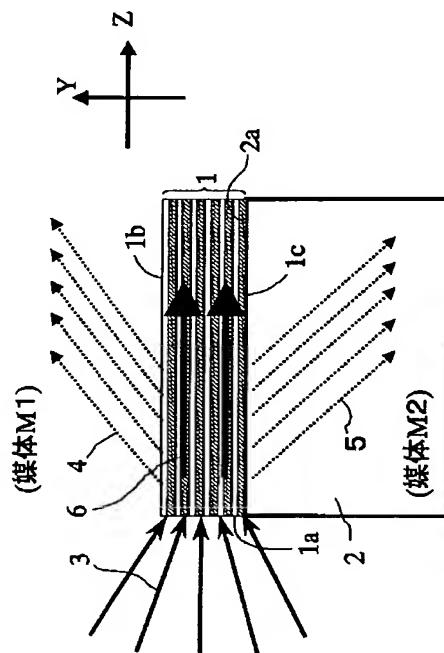
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 光学素子およびそれを用いた分光装置及び偏光分離装置

(57)【要約】

【課題】回折格子からの出射角の波長依存性は小さいため、回折格子を使用した光分波器の性能を向上させるためには装置を大型化せざるを得ないという問題点があった。

【解決手段】1次元フォトニック結晶とみなせる周期的多層構造体の層面と略垂直な端面を光入射面とし、その層面に平行な表面を光出射面とする光学素子において、使用波長 λ_0 に対応するフォトニック結晶の最低次ではない結合性バンドを利用する。



【特許請求の範囲】

【請求項1】1次元フォトニック結晶とみなせる1周期の長さが a である周期的多層構造体の1周期内の平均屈折率が、真空中における波長が λ_0 である光に対して n_s であるとき、 a が次の条件、

$$\lambda_0 / 2 n_s \leq a$$

を満たす前記多層構造体に対して、その層面と略垂直な端面を光入射面とし、前記層面に平行な表面を光出射面とする光学素子において、前記層面と平行であり周期構造を有さない方向について、前記波長 λ_0 に対応する前記フォトニック結晶の最低次ではない結合性バンドの波数ベクトルの大きさを k_s 、前記多層構造体の光出射面となる、層面に平行な表面に接する媒体の前記波長 λ_0 における屈折率を n_s とするとき、

$$0 < k_s \cdot \lambda_0 / (2\pi \cdot n_s) < 1$$

の条件が満たされることを特徴とする光学素子。

【請求項2】1次元フォトニック結晶とみなせる1周期の長さが a である周期的多層構造体の1周期内の平均屈折率が、真空中における波長が λ_0 である光に対して n_s であるとき、 a が次の条件、

$$\lambda_0 / 2 n_s \leq a$$

を満たす前記多層構造体に対して、その層面に平行な表面を光入射面とし、前記層面と略垂直な端面を光出射面とする光学素子において、前記層面と平行であり周期構造を有さない方向について、前記波長 λ_0 に対応する前記フォトニック結晶の最低次ではない結合性バンドの波数ベクトルの大きさを k_s 、前記多層構造体の光入射面となる、層面に平行な表面に接する媒体の前記波長 λ_0 における屈折率を n_s とするとき、

$$0 < k_s \cdot \lambda_0 / (2\pi \cdot n_s) < 1$$

の条件が満たされることを特徴とする光学素子。

【請求項3】前記結合性バンドが最低次から2番目の結合性バンドであることを特徴とする請求項1または2に記載の光学素子。

【請求項4】次式の条件

$$\cos 60^\circ \leq k_s \cdot \lambda_0 / (2\pi \cdot n_s) \leq \cos 20^\circ$$

を満たすことを特徴とする請求項1または2に記載の光学素子。

【請求項5】前記最低次の結合性バンドの波数ベクトルの大きさを k_1 とするとき、 k_s が、

$$0.9 k_1 / m \leq k_s \leq 1.1 k_1 / m \quad (m \text{は} 2 \text{以上の整数})$$

の条件を満たすことを特徴とする請求項1または2に記載の光学素子。

【請求項6】光入射面もしくは光出射面とする多層構造体の表面に接する媒体が空気もしくは真空であることを特徴とする請求項1または2に記載の光学素子。

【請求項7】前記周期的多層構造体が、使用波長に対して透明な基板上に形成した周期的に同じ構造を繰り返す

光学的多層膜層であり、前記基板と接する多層膜層の表面を光入射面もしくは光出射面とすることを特徴とする請求項1または2に記載の光学素子。

【請求項8】前記周期的多層構造体の1周期が互いに異なる材料各1層から構成されることを特徴とする請求項1または2に記載の光学素子。

【請求項9】前記周期的多層構造体を構成する各層の境界のなかに、連続的に組成もしくは特性が変化する層を含むことを特徴とする請求項1または2に記載の光学素子。

【請求項10】前記周期的多層構造体を構成する複数の物質間における最大屈折率と最小屈折率の比の値が、使用波長において1.1以上であることを特徴とする請求項1または2に記載の光学素子。

【請求項11】請求項1に記載の周期的多層構造体によって構成される光学素子と、該光学素子の多層構造体端面に複数波長の混合した光束を入射させる手段と、前記多層構造体の表面から波長ごとに異なる角度で出射される光線を検知する手段とを有することを特徴とする分光装置。

【請求項12】請求項1に記載の周期的多層構造体によって構成される光学素子と、該光学素子の多層構造体端面に複数の偏光成分を含む光束を入射させる手段と、前記多層構造体の表面から偏光成分ごとに異なる角度で出射される光線を検知する手段とを有することを特徴とする偏光分離装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、波長の異なる光を分離する分光光学素子、あるいは偏光方向の異なる光を分離する偏光分離光学素子に関するものである。

【0002】

【従来の技術】近年、インターネットの急速な普及により、光ファイバー通信網の容量の増大が強く求められており、その手段としてWDM(波長多重)通信の開発が急速に進められている。WDM通信においては、わずかな波長差の光が個別の情報を伝達することから、波長選択性の良い光分波器、フィルタ、アイソレータといった光学機能素子が必要である。上記機能素子においては、量産性、小型化、集積化、安定性などが強く求められていることは言うまでもない。

【0003】波長多重光通信のように人為的に複数の波長が多重化された光信号を分波・検出する目的や、分光測定のように被測定光のスペクトル解析等の目的に光分波器(または分光器)が用いられる。この光分波器には、ブリズム、波長フィルタ、回折格子等の分光素子が必要とされる。とくに回折格子は代表的な分光素子であり、石英やシリコン基板などの表面に周期的な微細凹凸構造を形成したものが用いられている。その周期的凹凸構造によって発生する回折光が互いに干渉し、ある特定

波長の光が特定の方向に出射される。この特性が分波素子として利用されている。

【0004】回折格子を用いた分光光学系の一例を図18に示す。光ファイバ21から出射した波長多重化された光線30はコリメータレンズ22で平行光31となり回折格子23に入射される。この光は回折格子23で分波され、波長ごとに異なった出射角をもって出射される。この出射光32は再びコリメータレンズ22を通過し、受光面24上に集光スポット群40を形成する。この各集光スポットの位置に受光手段としてフォトダイオードなどの光検出器、あるいは光ファイバの端面を設置すれば、所定の波長毎に分離した信号出力を得ることができる。また、回折格子に入射する光が連続スペクトルをもっていれば、受光面に設置する受光手段の間隔に応じてスペクトルの離散化した出力が得られる。

【0005】反射回折格子の場合、回折格子の回折次数をs、格子定数をd、使用波長を λ とし、回折格子を形成した面の法線と入射光線（光ファイバの光軸5）のなす角を θ_i 、出射光線のなす角を θ_o とすると、次式が成り立つ。

$$s \sin \theta_i + s \sin \theta_o = s \lambda / d$$

θ_i を一定とし、波長が λ だけ変化すると、回折格子から距離 L だけ離れた受光面上に到達する光線の位置の変化 Δx は、

$$\Delta x = (L s / (d \cos \theta_o)) \cdot \Delta \lambda$$

で与えられる。したがって波長間隔に応じて上式から計算される位置間隔で受光手段を受光面上に配列しておけば、各波長ごとに分離した信号が得られる。

【0006】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、回折格子からの出射角の波長依存性は小さい。例えば、光通信で用いられる波長1.55 μm帯で波長間隔0.8 nm（周波数間隔100 GHzに相当）の光を分波する場合を考える。回折次数s=25次とし、入射角 $\theta_i=71.5^\circ$ 、出射角 $\theta_o=38.5^\circ$ とすると、回折格子の格子定数dは24.7 μmとなる。この系で上記波長間隔0.8 nmに対して得られる出射角の変化は約0.06°に過ぎず、50 μm間隔で配列した受光素子でこれを分離して受光するためには $L=48 \text{ mm}$ の距離が必要となる。

【0007】すなわち、受光面上の光スポットの位置変化 Δx は受光手段が一定の大きさをもつため、通常数10 μm以上とする必要がある。回折格子の定数であるm、dは大きくは変えられないため、小さい波長変化 $\Delta \lambda$ に対して必要な Δx を得るために距離 L を大きくする必要があり、回折格子を使用した光分波器の性能を向上させるためには装置を大型化せざるを得ないという問題点があった。

【0008】また、回折角度には偏光方向による差がないので、通常の回折格子によって角度による偏光分離を

行なうことはできない。したがって、光システムにおいて偏光分離機能が必要とされる場合は、回折格子とは別に偏光分離素子が必要になることもある。

【0009】本発明の目的は、このような問題点を解決するため、従来の回折格子よりも大きい波長分散特性を有する光学素子を提供することにある。また、本発明の他の目的は、波長分散と同時に、角度による偏光分離の機能を備えた光学素子を提供することにある。

【0010】

【課題を解決するための手段】本発明においては、1次元フォトニック結晶とみなせる1周期の長さがaである周期的多層構造体の1周期内の平均屈折率が、真空中における波長 λ_0 である光に対して n_s であるとき、aが次式の条件、

$$\lambda_0 / 2 n_s \leq a$$

を満たす多層構造体に対して、その層面と略垂直な端面を光入射面とし、前記層面に平行な表面を光出射面とする光学素子において、その層面と平行であり周期構造を有さない方向について、前記波長 λ_0 に対応するフォトニック結晶の最低次ではない結合性バンドの波数ベクトルの大きさを k_s 、多層構造体の光出射面となる、層面に平行な表面に接する媒体の前記波長 λ_0 における屈折率を n_s とするとき、

$$0 < k_s \cdot \lambda_0 / (2\pi \cdot n_s) < 1$$

の条件が満たすようにする。入出射面は入れ替えるてもよい。

【0011】上記の結合性バンドとしては最低次から2番目の結合性バンドがもっとも好ましい。また上式の条件範囲のうち、

$$\cos 60^\circ \leq k_s \cdot \lambda_0 / (2\pi \cdot n_s) \leq \cos 20^\circ$$

を満たす範囲がさらに好ましい。また、最低次の結合性バンドの波数ベクトルの大きさを k_s とするとき、 k_s が、

$$0.9 k_s / m \leq k_s \leq 1.1 k_s / m \quad (m \text{は} 2 \text{以上の整数})$$

の条件を満たすことが望ましい。

【0012】以上の条件を満たす範囲において、周期的多層構造体を、使用波長に対して透明な基板上に形成した周期的に同じ構造を繰り返す光学的多層膜層とし、基板と接する多層膜層の表面を光入射面もしくは光出射面とした光学素子が構成上好ましい。この場合、周期的多層構造体の1周期が互いに異なる材料各1層から構成してもよく、また各層の境界のなかに、連続的に組成もしくは特性が変化する層を含んでもよい。ただし、周期的多層構造体を構成する複数の物質間における最大屈折率と最小屈折率の比の値が、使用波長において1.1以上であることが望ましい。また、光入射面もしくは光出射面となる多層構造体の表面に接する媒体は、空気もしくは真空であることが使用し易く望ましい。

【0013】上記の周期的多層構造体によって構成される光学素子と、この光学素子の多層構造体端面に複数波長の混合した光束を入射させる手段と、前記多層構造体の表面から波長ごとに異なる角度で出射される光線を検知する手段とを有することにより、分光装置を提供することができる。また同様の構成で偏光分離装置を提供することができる。

【0014】本発明における周期的多層構造体は1次元フォトニック結晶と見なせ、その機能によって優れた分光作用、偏光分離作用を得ることができる。

【0015】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施の形態について具体的に説明する。本発明では、周期的な多層構造により構成される1次元フォトニック結晶を分光素子として利用する。光の波長程度もしくはそれ以下の厚さの薄膜から構成される周期的多層膜は、1次元フォトニック結晶としての性質を有することから、高反射膜、偏光分離フィルタ、波長選択性フィルタなどの光学素子として既に実用化しており、広く用いられている。

【0016】ところで、光学的多層膜の利用にあたっては、通常基板表面に設けた多層膜層の最上面から最下面まで貫通する光線を前提として考えられているものがほとんどである。多層膜層の端面、すなわち周期的構造が露出している面を、光入射面もしくは光出射面として使用した例としては、以下のようなものがあるに過ぎない。

【0017】傾いた多層膜層の断面に入射する光線の方向の理論的な解析が示され (Applied Physics B, 39巻, p.231, 1986年)、また、構造性複屈折による偏光分離をねらいとし、多層膜層の屈折率がTE, THの偏光によって大きく異なる性質(いわゆる構造性複屈折)を利用して、複屈折材料と同様の偏光分離効果を得たことが開示されている (Optics Letters 15巻, 9号, p.516, 1990年)。さらに周期的多層膜層を1次元フォトニッククリスタルと考え、第1バンドの形状がバンドギャップ近傍で直線状となることから、非常に大きい分散(スーパークリスルム効果)が得られるとした報告もある ("International Workshop on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures" Technical Digest, F1-3)。本発明では、周期的多層構造体の端面を光入射面もしくは光出射面として用い、大きい波長分散効果を得ることを特徴とする。

【0018】図1は本発明の基本的実施形態の一例である。平面基板2の片側表面2aに、基板表面と垂直な方向(Y方向)に周期を有する多層構造体1を形成する。多層構造体部分の端面1aから、基板表面2aと平行なZ軸方向の入射光3を送り込み、多層構造体1の表面1bから屈折する出射光4もしくは表面1cから出射光5を取り出す。図1に示すような構成により、ガラスなど均質な物質に設けたプレーズ回折格子よりはるかに大き

い波長分散を得ることができる。

【0019】上記現象の原理について簡単に説明する。まず、屈折率が均質な2つの媒体の境界における光の屈折を作図によって表現する方法を図2を用いて説明する。屈折率n_Aの媒体Aと屈折率n_Bの媒体B (n_A < n_Bとする) の媒体A側境界面近傍を、境界面と平行に進む光線R_Aは、角度θの屈折光R_Bとなって媒体B側に放出される。

【0020】この角度θは、半径がn_Aとn_Bに比例した2つの円C_A、C_Bを用いた作図によって求めることができる。図2に示すように円C_A、C_Bを描く。光線R_Aに対応する方向をもつベクトルを円C_A上からの法線として描く。この円C_A上の点から2つの円の中心を結ぶ直線に平行な直線を引き、円C_Bとの交点を求める。この交点から円C_Bの法線方向にベクトルを描くと、これが屈折光R_Bの方向を示している。

【0021】図3は、無限に広がる多層構造体1の模式図であり、厚さt_Aの物質A(屈折率、n_A)と厚さt_Bの物質B(屈折率、n_B)を交互に積み重ねた周期a=(t_A+t_B)の構造である。このような多層構造体1は1次元のフォトニック結晶とみなすことができ、フォトニック結晶の理論によりフォトニックバンド図を計算により求めることができる。計算の方法は、"Photonic Crystals", Princeton University Press (1995)あるいは、Physical Review B 44巻、16号、p.8565、1991年、などに詳しい。

【0022】周期的多層構造体のバンド図の範囲は図3のY方向(周期方向)には限定されるが、XおよびZ方向(平面の広がる方向)には無限に広がっている。図4と図5は、

$$n_A = 1.44 \quad (t_A = 0.5a)$$

$$n_B = 2.18 \quad (t_B = 0.5a)$$

の層を交互に重ねた周期aの多層膜についての、平面波法によるバンド計算の結果を、TH偏光とTE偏光のそれぞれ第1～第3バンド(下から1、2、3番目のバンド)について示したものである。ここで、TH偏光は磁場の向きがX軸方向である偏光を、TE偏光は電場の向きがX軸方向である偏光をそれぞれ表わす。

【0023】なお、図4、図5の各曲線に対して示した数字は、

$$\text{規格化周波数 } \omega a / 2\pi c$$

である。ここで、 ω は入射光の角振動数、aは多層構造体の周期、cは真空中での光速である。規格化周波数は、真空中の入射光波長 λ を用いて、 a/λ とも表わすことができるので、以下では a/λ と記述する。図4と図5は、逆空間における1周期を表わすブリルアンゾーンであり、縦はY軸方向で上下の境界は中心から π/a の範囲を表わす。横はZ軸方向(X軸方向でも同じ)であり、周期性がない方向なので境界線は存在せず、図の両端は計算の範囲を示す便宜的なものである。

ブリルアンゾーン内での位置は多層構造体内での波数ベクトルを、曲線は入射光波長 λ_0 に対応するバンドを意味する。

【0024】ここで、図3の構造においてXY平面を入射端面として、この端面からZ軸方向に平面波（TH偏光）を垂直入射させる場合について、フォトニック結晶内の伝播光を考える。図4の各バンド図（TH）において、原点からZ軸方向について a/λ_0 の値の変化を示したのが図6である。同様に図5の各バンド図（TE）において、原点からZ軸方向について a/λ_0 の値の変化を示したのが図7である。ただし、図6ではバンドの交叉があるので、図4に示す第2バンドと第3バンドを途中で入れ替えて表示している。図6に示すように、入射光の真空中の波長が λ_0 の場合、フォトニック結晶内では第1バンドに対応する波数ベクトル $k_{a,1}$ が存在する。換言すると、周期 $\lambda_{a,1} = 2\pi/k_{a,1}$ の波動としてフォトニック結晶内をZ軸方向に伝播する（以下、第1バンド光とする）。

【0025】ところが、入射光の真空中の波長が λ_0 の場合には、第1、第2、第3バンドに対応する波数ベクトル $k_{a,1}$ 、 $k_{a,2}$ 、 $k_{a,3}$ が存在する。従って、周期 $\lambda_{a,1} = 2\pi/k_{a,1}$ の第1バンド光、 $\lambda_{a,2} = 2\pi/k_{a,2}$ の第2バンド光、および $\lambda_{a,3} = 2\pi/k_{a,3}$ の第3バンド光がそれぞれフォトニック結晶内をZ軸方向に伝播する。ところが、この構造においては第2バンドが「非結合性」バンドなので、実際には伝播しない。非結合性バンドについての理論は、Physical Review B、52巻（1995年）7982頁、あるいはPhysical Review Letters、68巻（1995年）2023頁などの文献に記述されている。

【0026】図8は波長 λ_0 の入射光が周期的多層構造体に入射したときのZ軸方向への伝播光と、多層構造体の両側の表面に接する媒体M1、M2への屈折光とを第3バンドについてそれぞれ示したものである。第3バンド伝播光は、波数ベクトル k に応じた角度 θ で、多層構造体表面に接する媒体M1との界面から屈折光となって出射される。ただし、屈折光が射出されるためには、図から明らかなように、円の半径で表される媒体の屈折率が一定値より大きい必要がある。円の半径は、媒体の屈折率を n として $2\pi n/\lambda_0$ であることから、

$$k < 2\pi n/\lambda_0$$

であれば屈折光が射出される。屈折光の角度 θ は一定値なので、射出光は非常に指向性の良い光束となる。

【0027】つぎに、上記屈折光を分光素子として利用するための条件について述べる。真空中での波長 λ_0 に対して、対応するフォトニック結晶中の周期は $2\pi/k$ （たとえば図6の横軸）となるので、 $\lambda_0/(2\pi/k)$ を実効屈折率と定義する。図6から理解できるように、最低次である第1バンド光の a/λ_0 と k はほぼ比例するため、実効屈折率も λ_0 によりほとんど変化しないので、屈折光の波長分散も小さい。ところが、第2バ

ンド、第3バンドでは、 a/λ_0 と k が比例関係から大きくはずれているので、 λ_0 のわずかな違いに対しても、実効屈折率が大きく変化する。すなわち、屈折光に非常に大きい波長分散が現われるので、分光素子として利用できる。これは、いわゆるスーパープリズム効果の一種である。スーパープリズム効果は、Physical Review B、58巻（1998年）10096頁の文献で提唱されている。

【0028】図には示していないが、第4以上のバンドも大きい波長分散を示す。しかし、バンドの重なりを防ぐためには、第2、第3といった低次のバンドを利用することが望ましい。ただし、上述したように「非結合性」バンドは利用できないので、最も望ましいバンドは「最低次から2番目の結合性バンド」であり、図6においては第3バンドがこれに相当する。

【0029】多層構造体の1周期内の平均屈折率（後述）を n_m とすると、概略

$$a/\lambda_0 \leq 0.5/n_m$$

の範囲では第1バンドしか存在しない（図4、図5参照）。上記のように、第1バンドは利用に適さないで、多層構造体の周期 a は使用波長 λ_0 に対して $\lambda_0/2n_m \leq a$

の関係を満たす必要がある。

【0030】また、使用波長 λ_0 に対する媒体の屈折率を n_s 、最低次ではない結合性バンドの波数ベクトルを k_s とすると、屈折が起こるための条件は上述したよう

$$0 < k_s < 2\pi n_s/\lambda_0$$

もしくは、

$$0 < k_s \cdot \lambda_0 / (2\pi \cdot n_s) < 1$$

である。

【0031】また、図2の多層構造体はX軸方向とY軸方向の構造に大きな違いがあるため、偏光方向により実効屈折率は異なる値となる。これは、図6（TH偏光）と図7（TE偏光）のグラフが異なることからも明らかである。従って、多層構造体の屈折光の角度 θ はTE偏光、TH偏光で異なる値となり、偏光分離の作用がある。従って、本発明の光学素子では波長による分光と偏光分離を同時に実現することができる。このため、従来の回折格子と偏光分離素子の組合せによる機能を単一の素子で実現でき、光システムを単純化することができる。

【0032】周期的多層構造体は、図3に示すような2種類の物質による構成に限定されない。物質は3種類以上であってもよい。ただし積層は各層の屈折率、厚みが一定の周期をもっている必要がある。周期的多層構造体は一般的には n 種類（ n は正の整数）の物質の積層体からなる。1周期を構成する物質 $1, 2, \dots, n$ の屈折率を n_1, n_2, \dots, n_n 、厚さを t_1, t_2, \dots, t_n とする。また使用波長 λ_0 における多層構造体一周期あたりの平均屈折率 n_m を

$$n_m = (t_1 \cdot n_1 + t_2 \cdot n_2 + \dots + t_n \cdot n_n) / a$$

と定義する。1周期aは、

$$a = t_1 + t_2 + \dots + t_n$$

である。

【0033】図8に示すように、屈折光は多層構造の両側から取り出すことができる。媒体M1の屈折率が媒体M2の屈折率より小さい場合、

- ① 屈折光は、M1側、M2側共に発生しない
- ② 屈折光は、M2側のみ発生する
- ③ 屈折光は、M1側、M2側共に発生する

の3種類に分類することができる。屈折光を片側に集中させたければ②の条件、両側で個別に利用したければ③の条件を選べば良い。①の条件では本発明の光学素子として機能させることができない。

【0034】入射光の分割による屈折光強度の低減を防ぐために、多層構造体の片面に反射層を設けることにより、屈折光を反射層の逆側に集中させ強度を上昇させることもできる。たとえば、媒体M1として空気（もしくは真空）を用いると屈折光の波長分散を最大とすることができるものの、M2側への屈折光が必ず生じてしまう。そこで、例えば多層構造体と媒体M2の界面に反射層を設ければ空気側に屈折光を集中することができる。

【0035】図6、図7から明らかなように、多層構造体の内部で第2バンド以上の光が伝播する条件では第1バンド伝播光が必ず存在する。第1バンド光は波長分散の目的には不適なので、入射光の利用効率という点では損失となる。発明者らのシミュレーションによると、多層構造を構成する物質の屈折率比を大きくするほど、第2バンド以上の伝播光の割合が（第1バンド伝播光と比較して）増加するので、入射光の利用効率を高めることができる。

【0036】本発明に用いるフォトニック結晶の材料としては、使用波長域における透明性が確保できるものであれば特に限定はないが、一般的に多層膜の材料として用いられ、耐久性や製膜コストの点で優れたシリカ、酸化チタン、シリコン、酸化タンタル、酸化ニオブ、フッ化マグネシウムなどが適する材料である。ただし、材料間の屈折率比が小さいと変調作用が弱くなり、期待される作用が発揮されないこともあるので、材料間の最大屈折率比として0.1以上確保することが望ましい。材料を適切に選定すれば、本発明の作用は通常使用される200nm～20μm程度の波長範囲で発揮される。

【0037】多層膜を形成する方法としては、真空蒸着、スパッタ、イオンアシスト蒸着、CVD法などを利用することができる。また、フォトニック結晶を構成する各層が、連続的に屈折率が変化するものであっても、屈折率差が確保されれば特性はほとんど同じとなる。基板の材質としても、使用波長域における透明性が確保できるものであれば特に限定はなく、ソーダライムガラス、光学ガラス、シリカ、シリコン、あるいはガリウム砒素などの化合物半導体などが適する材料である。

温度特性などの限定が小さければ、プラスチック材料でも良い。

【0038】本発明は、例えば平面基板上に、基板表面と平行な方向に周期を有する多層構造体を作製して、平板状光回路部品として使用することもできる。また、以上述べた構成では入射光を多層構造体の端面から入射し、層面に平行な表面から出射させているが、入射光と出射光を入れ換えて使用することもできる。同一構造の多層構造体であれば、端面から入射する場合と入射光の間でちょうど逆の関係が成り立つ。したがって入射光を多層構造体の表面に対して一定の角度で入射する。波長に対して適切な入射角度を設定すると、入射光は多層構造体の層面に沿って伝搬し、端面から出射する。すなわち異なる波長の光を合波する機能が具備されていることになる。

【0039】以上、説明した光学素子は図9に示すように分光装置として構成することができる。図1同様に基板2上に周期的多層構造体1を形成し、分光機能を備えた光学素子20とする。この例では分波光5を基板2側に出射させるため、多層構造体の表面には反射層7を設け、表面側に出射する屈折光を反射させ、分波光としての利用率を向上するようにしている。複数波長 λ_1 、 λ_2 、…を含む入射光3を多層構造体端面1aから入射させる。入射手段としてはレンズ等を用いて入射光を空間的に結合する。この他、光ファイバ、光導波路等を用いて入射光を結合してもよい。

【0040】入射した光は上で説明した原理により波長毎に異なる角度で基板2側に出射され、分波光5となる。これをレンズ28で集光すると、光検出手段29の受光面上の異なる位置に入射させることができる。光検出手段を受光素子アレイとすれば、異なる波長の光を異なる素子で受光するように設定することができる。あるいは複数の光ファイバを配列し、異なる波長の光が異なる光ファイバに入射するようにしてもよい。

【0041】また、この光学素子は偏光分離機能を有するため、図10に示すように偏光分離装置30として構成することもできる。複数の偏光成分を含む光、例えば单一モード光ファイバ32の伝搬光を多層構造体1の端面1aに入射する。入射した光は異なる偏光成分に対して異なる角度で多層構造体1の表面から出射する。これを上記分光装置同様にレンズ28で集光すると、光検出手段29の受光面上の異なる位置に入射させることができる。それぞれ複数の偏光成分を含む異なる波長の光を入射し、波長分離（分波）と偏光分離を同時に行うことも可能である。

【0042】（実施例）厚さ1mmの平行平面基板2（材質は石英ガラス）の片面に多層膜層1を形成した。基板表面に酸化チタン（厚さ $t_1 = 212\text{nm}$ ）の薄膜、次にシリカ（厚さ $t_2 = 212\text{nm}$ ）の薄膜を形成して1周期とし、これを20周期（40層）繰り返し

た。空気と接する表面はシリカ層である。

【0043】上記基板を切断・研磨して、幅1mm、長さ20mmの棒状サンプル(図11)として、図12の装置により波長分散を測定した。光源としてはキセノンランプの白色光をモノクロメータにて略単色光源としたものを用いた。モノクロメータからの出射光は、マルチモード光ファイバを通した後に略平行光束として偏光プリズム13を通過させ、対物レンズ14により概略NA=0.1の収束光とし、焦点位置にサンプルの多層膜垂直端面を置いて入射させた。

【0044】偏光プリズム14により入射光をTE偏光とした場合での、空気側屈折光の角度を、f-θレンズ系をもつ可視用CCDカメラで測定した。方向角θと入射光波長λ₀の関係を図13に示す。図13の「理論値」は、第3バンド光の屈折角を、平面波法によるバンド計算結果から求めたものである。λ₀の波長変化△λ=1%に対して、屈折角θは△θ≈2.2°変化した。上記波長分散は、通常のスリット型の回折格子などと比べると、はるかに大きい値である。

【0045】ここで実験値が示されている屈折角θが20°~60°の範囲ではとくに強い屈折光が得られた。そこで、上で規定したk_s・λ₀/(2π・n_{s1})の範囲のうち、屈折角が20°~60°となるつぎの範囲、cos60°≤k_s・λ₀/(2π・n_{s1})≤cos20°。

がさらに望ましい範囲である。

【0046】また、実験によると、k_sとk₁が簡単な整数比、すなわち

$$k_s = k_1/m \quad (m = 2, 3, 4, \dots)$$

となる波長の前後±10%程で屈折光は特に強く現われる現象が観察された。従って、

$$0.9k_1/m \leq k_s \leq 1.1k_1/m$$

も好ましい範囲である。なかでも、k_sを「最低次から2番目の結合性バンド」の波数ベクトル(m=2)とする条件が最も実現容易で好適な条件である。上記の現象が起こる原因について、詳しいことは不明であるが、伝播光の周期が整数比となることによって共鳴が起こり、k_sに対応する波長の伝播光が屈折しやすくなつたのではないかと考えられる。つぎに2、3の条件で光学素子の特性を計算結果により説明する。

【0047】(計算例1)以下の計算例において波長λ₀、周期aの数値は便宜的なものであり、a/λ₀の値が同じであればスケール以外は同じ結果となる。図3に模式図を示した、1周期が2層により構成される構造について、以下の条件を設定した。

$$\text{屈折率 } n_s = 1.44$$

$$\text{屈折率 } n_1 = 2.28$$

$$\text{層厚 } t_1 = 0.5a$$

$$\text{層厚 } t_2 = 0.5a$$

ただし、aはY方向の周期長である。したがって

多層構造体の平均屈折率n_s=1.81

となる。また、

【0048】多層構造体の表面と接する媒体M1の屈折率n_{s1}=1.50

$$a/\lambda_0 = 0.730$$

とした。上記構造の多層構造体に対して、XY平面を入射面として、真空から波長λ₀の平面波(TE偏光)を入射させる。以上の設定条件において、平面波法によるフォトニックバンド計算を行ない、以下の結果を得た。

【0049】第1バンドの波数ベクトルの大きさは、

$$k_1 = 1.46 \cdot 2\pi/a \quad (\text{TE偏光, Z方向})$$

であり、第3バンドの波数ベクトルの大きさは、

$$k_3 = 0.727 \cdot 2\pi/a \quad (\text{TE偏光, Z方向})$$

である。したがって両者の比は、

$$k_3/k_1 = 2.01$$

となり、ほぼ整数m=2に相当する。また、

$$\lambda_0/2n_s = 0.378a$$

であり、λ₀/2n_s < aの関係を満たしている。さらに、

$$k_s \cdot \lambda_0 / (2\pi \cdot n_{s1}) = 0.664 = \cos 48^\circ$$

である。

【0050】上記設定条件の多層構造体について、YZ平面内の電磁波を有限要素法によりシミュレーションした結果を画像表現した結果を図14に示す。図で縞状に示されている濃淡が光の波面を示しており、濃淡のコントラストが大きいほど、光の振幅、すなわち強度が大きいことを意味する。媒体M1側に、非常に強い屈折光が生じていることがわかる。屈折角は、

$$M1 \text{側 } \theta_1 = 50^\circ$$

であり、バンド計算結果(48°)に近い値となった。

【0051】(計算例2)計算例1と、a/λ₀の値のみが異なるつぎの条件で計算を行なった。

$$a/\lambda_0 = 0.758$$

計算結果を以下に記す。第1バンドの波数ベクトルの大きさは、

$$k_1 = 1.52 \cdot 2\pi/a \quad (\text{TE偏光, Z方向})$$

であり、第3バンドの波数ベクトルの大きさは、

$$k_3 = 0.798 \cdot 2\pi/a \quad (\text{TE偏光, Z方向})$$

である。両者の比は、

$$k_3/k_1 = 1.90$$

$$\lambda_0/2n_s = 0.378a$$

$$k_s \cdot \lambda_0 / (2\pi \cdot n_{s1}) = 0.702 = \cos 45^\circ$$

【0052】上記設定条件の多層構造体について、YZ平面内の電磁波を有限要素法によりシミュレーションした結果を図15に示す。媒体M1側に、強い屈折光が生じていることがわかる。屈折角は、

$$M1 \text{側 } \theta_1 = 47^\circ$$

であり、バンド計算結果(45°)とほぼ一致した。

【0053】計算例1と計算例2を比較すると、入射波長の違いが屈折角の分散となっていることがわかる。計

13

算例2 ($a/\lambda_0 = 0.758$) の入射波長を入とする
と、計算例1 ($a/\lambda_0 = 0.730$) の入射波長は
1.038 λ ($\Delta\lambda = 3.8\%$) である。屈折角の差は
3° なので、 $\Delta\lambda = 1\%$ あたりの屈折角差 $\Delta\theta$ は約0.8° である。

【0054】(計算例3) 図3に模式図を示した、1周期が2層により構成される構造について、以下の条件を設定した。

屈折率 $n_1 = 1.44$

屈折率 $n_2 = 2.28$

Y方向の周期長 $a = 430\text{ nm}$

層厚 $t_1 = 0.5a$

層厚 $t_2 = 0.5a$

上記同様、多層構造体の平均屈折率 $n_u = 1.81$

となる。また、

多層構造体の表面と接する媒体M1の屈折率 $n_{11} = 1.00$

多層構造体の表面と接する媒体M2の屈折率 $n_{12} = 1.44$

とした。XY平面を入射面として、真空から波長 $\lambda_0 = 633\text{ nm}$ の平面波(TE偏光)を入射させる。したがって

$a/\lambda_0 = 0.679$

である。

【0055】以上の設定条件において、平面波法によるフォトニックバンド計算を行ない、以下の結果を得た。第1バンドの波数ベクトルの大きさは、

$k_1 = 1.35 \cdot 2\pi/a$ (TE偏光、Z方向)

であり、第3バンドの波数ベクトルの大きさは、

$k_3 = 0.596 \cdot 2\pi/a$ (TE偏光、Z方向)

である。したがって両者の比は、

$k_1, k_3 = 2.27$

となる。また、

$\lambda_0/2n_u = 179.4\text{ nm} = 0.417a$

であり、 $\lambda_0/2n_u < a$ の関係を満たしている。さらに、

$k_1 \cdot \lambda_0 / (2\pi \cdot n_{11}) = 0.877 = \cos 29^\circ$

$k_3 \cdot \lambda_0 / (2\pi \cdot n_{12}) = 0.585 = \cos 54^\circ$

が得られた。

【0056】上記設定条件の多層構造について、YZ平面内の電磁波を有限要素法によりシミュレーションした結果を図16に示す。媒体M1側、M2側に、強い屈折光が生じていることがわかる。屈折角は、

M1側 $\theta_1 = 33^\circ$

M2側 $\theta_2 = 55^\circ$

であり、バンド計算結果(29°、54°)とほぼ一致した。

【0057】(比較計算例4)

多層構造体の表面と接する媒体M1の屈折率 $n_{11} = 1.00$

多層構造体の表面と接する媒体M2の屈折率 $n_{12} = 1.44$

とした。XY平面を入射面として、真空から波長 $\lambda_0 = 633\text{ nm}$ の平面波(TE偏光)を入射させる。したがって

$a/\lambda_0 = 0.679$

である。

【0058】以上の設定条件において、平面波法によるフォトニックバンド計算を行ない、以下の結果を得た。

第1バンドの波数ベクトルの大きさは、

$k_1 = 1.35 \cdot 2\pi/a$ (TE偏光、Z方向)

であり、第3バンドの波数ベクトルの大きさは、

$k_3 = 0.596 \cdot 2\pi/a$ (TE偏光、Z方向)

である。

【0059】図3に模式図を示した、1周期が2層により構成される構造について、以下の条件を設定した。

屈折率 $n_1 = 1.44$

屈折率 $n_2 = 2.18$

Y方向の周期 $a = 200\text{ nm}$

$t_1 = 0.5a$

$t_2 = 0.5a$

この場合、上記同様、多層構造体の平均屈折率 $n_u = 1.81$ となる。また、多層構造の表面と接する媒体M1の屈折率 $n_{11} = 1.50$ とした。XY平面を入射面として、真空から波長 $\lambda_0 = 633\text{ nm}$ の平面波(TE偏光)を入射させる。したがって

$a/\lambda_0 = 0.316$

である。

【0060】上記設定条件において、平面波法によるフォトニックバンド計算を行ない、以下の結果を得た。第1バンドの波数ベクトルの大きさは、

$k_1 = 0.592 \cdot 2\pi/a$ (TE偏光、Z方向)

であるが、第3バンドの波数ベクトルは存在しない(TE偏光、Z方向)。また

$\lambda_0/2n_u = 174.9\text{ nm} = 0.875a$

であり、 $\lambda_0/2n_u$ は a より小さいが、両者はかなり近い値となっている。

$k_1 \cdot \lambda_0 / (2\pi \cdot n_{11}) = 1.25 > 1$

となり、第1バンド屈折光は存在しない。

【0061】上記設定条件の多層構造について、YZ平面内の電磁波を有限要素法によりシミュレーションした結果を図17に示す。多層構造に第3バンド伝播光が存在せず、第1バンド光も屈折する条件ではないので、媒体側にはごく弱いノイズ光しか認められない。

【0062】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によれば、周期的多層構造体に複数のバンド光が伝播する場合、分散性の高いものを屈折光としてとりだすことができ、かつその相対的強度も増加させ出力効率を高めることができとなる。従って、波長分散角の非常に大きい分光素子

とすることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の光学素子の基本構造を示す模式図である。

【図2】2層の均質物質における伝播光と屈折光の関係を示す図である。

【図3】本発明の周期的多層構造体を示す説明図である。

【図4】周期的多層構造体のTH偏光におけるフォトニックバンド図の一例を示す図である。

【図5】周期的多層構造体のTE偏光におけるフォトニックバンド図の一例を示す図である。

【図6】TH偏光におけるフォトニックバンド図の原点からZ軸方向への a/λ_0 変化を示す図である。

【図7】TE偏光におけるフォトニックバンド図の原点からZ軸方向への a/λ_0 変化を示す図である。

【図8】周期的多層構造体のフォトニックバンド図と両側表面からの屈折光の関係を示す図である。

【図9】周期的多層構造体を用いて構成した分光装置を示す図である。

【図10】周期的多層構造体を用いて構成した偏光分離装置を示す図である。

【図11】実験用光学系に用いた多層構造体試料を示す図である。

【図12】実験用光学系を示す図である。

【図13】本発明実施例の波長分散性を示す図である。*

*【図14】本発明の計算例における結果を示す図である。

【図15】本発明の他の計算例における結果を示す図である。

【図16】本発明の他の計算例における結果を示す図である。

【図17】本発明の他の計算例における結果を示す図である。

【図18】従来の分光装置の光学系を示す図である。

10 【符号の説明】

1 多層構造体、多層膜層

2 基板

3 入射光

4 屈折光（空気側）

5 屈折光（基板側）

6 伝播光

7 反射層

8 キセノンランプ

9 モノクロメータ

20 10 マルチモード光ファイバ

11 コリメータ

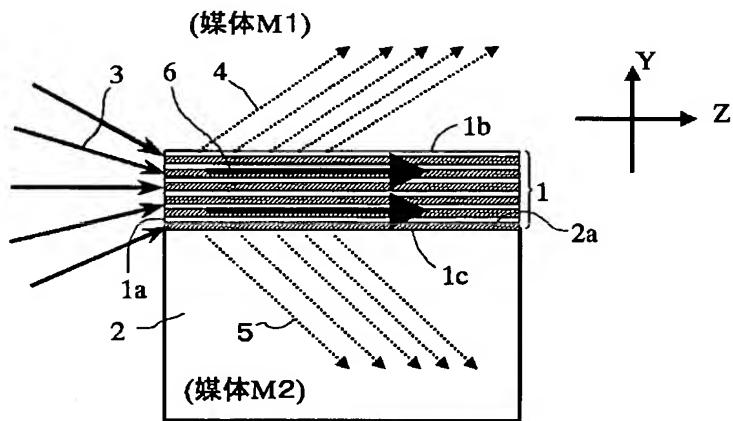
12 偏光ブリズム

13 対物レンズ

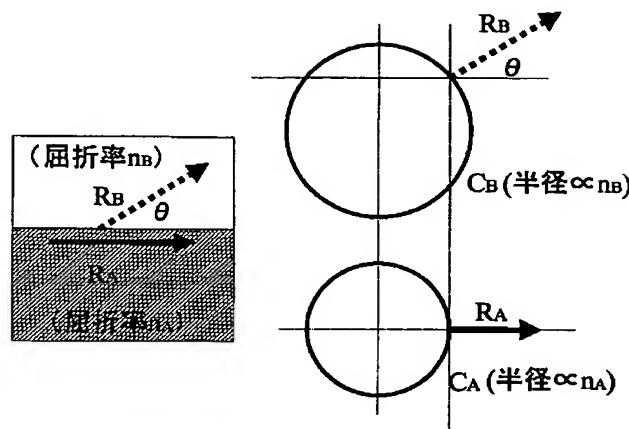
14 f-θレンズ系

15 CCDカメラ

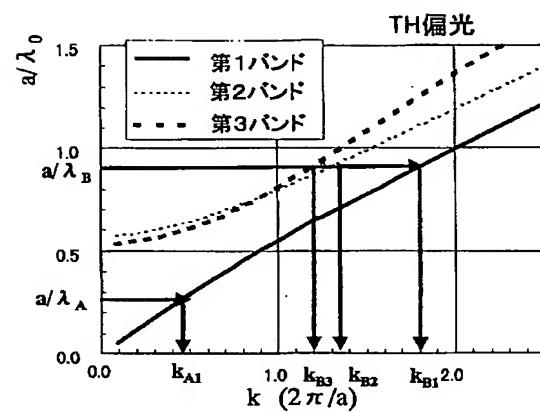
【図1】



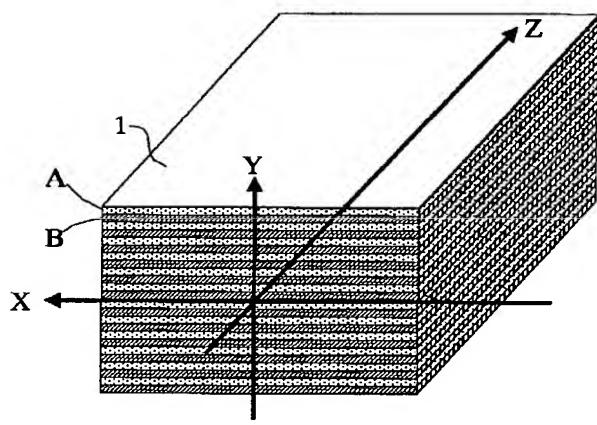
【図2】



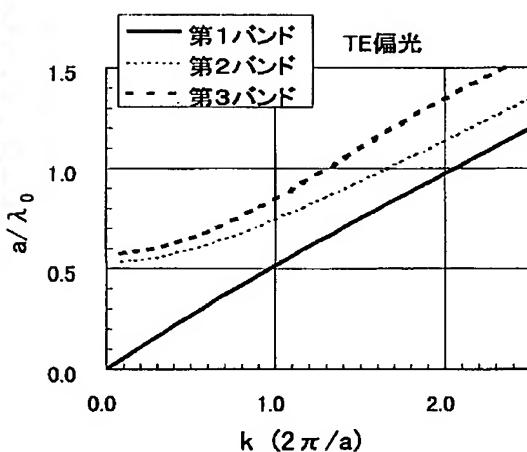
【図6】



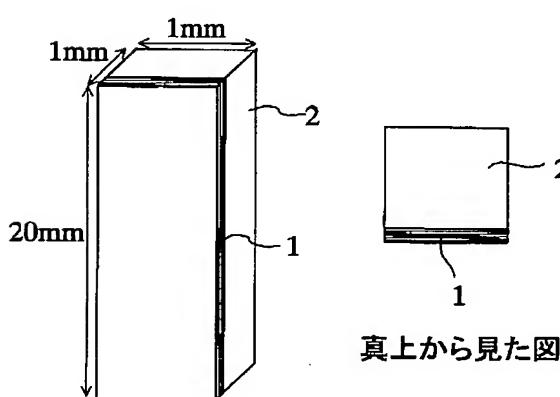
【図3】



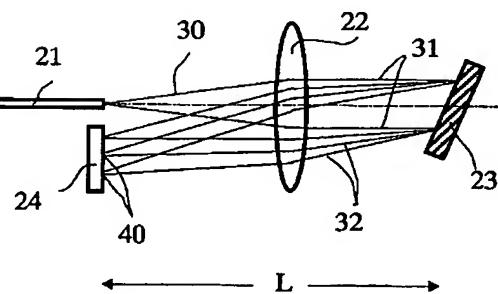
【図7】



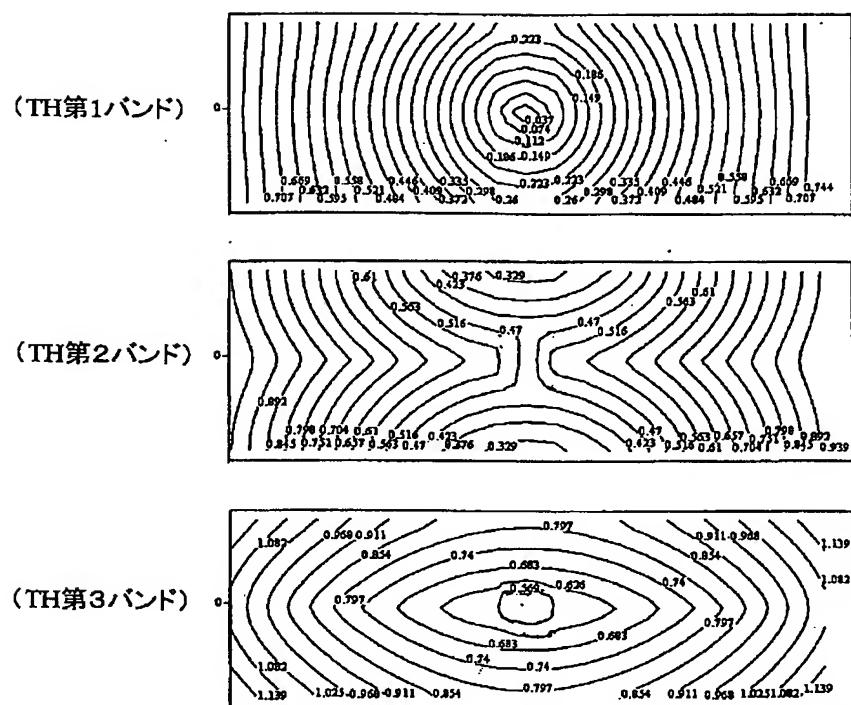
【図11】



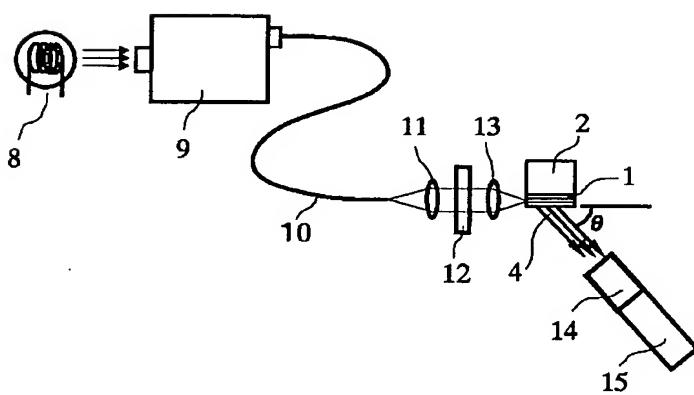
【図18】



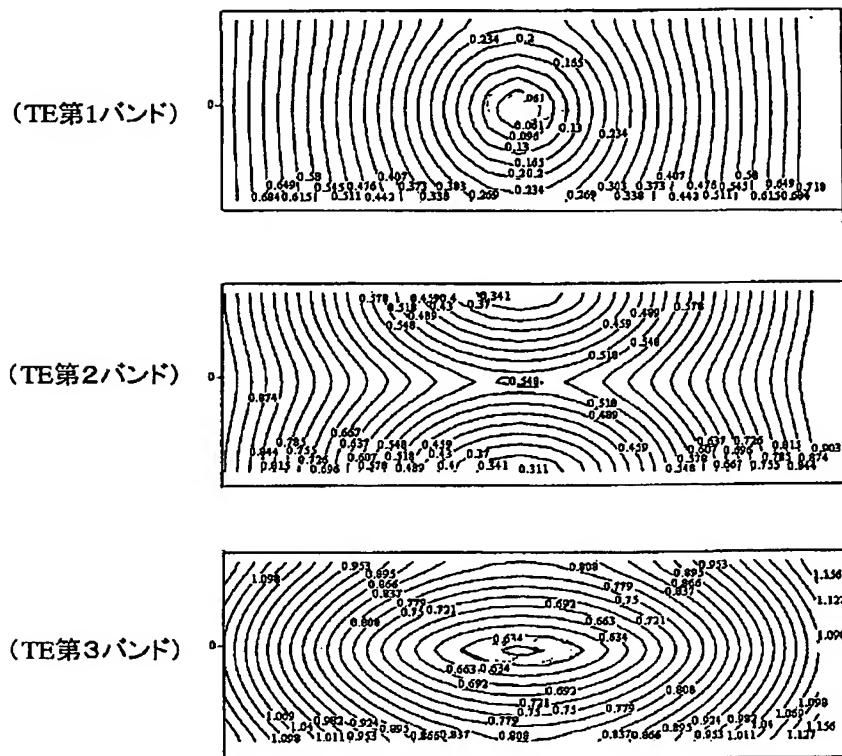
[図4]



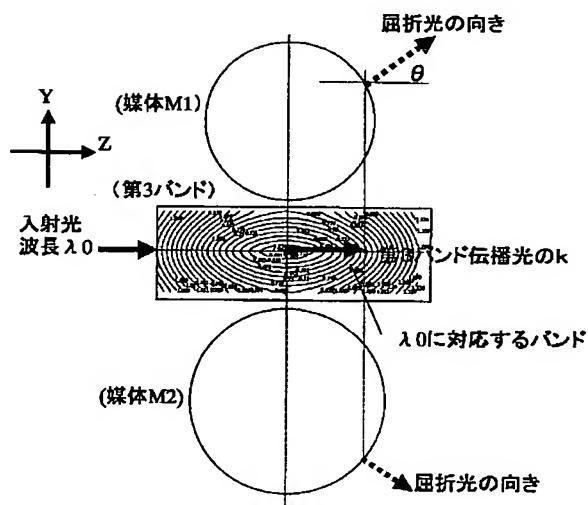
[図12]



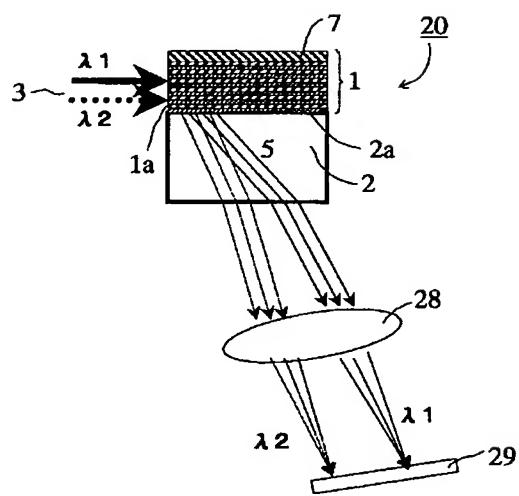
【図5】



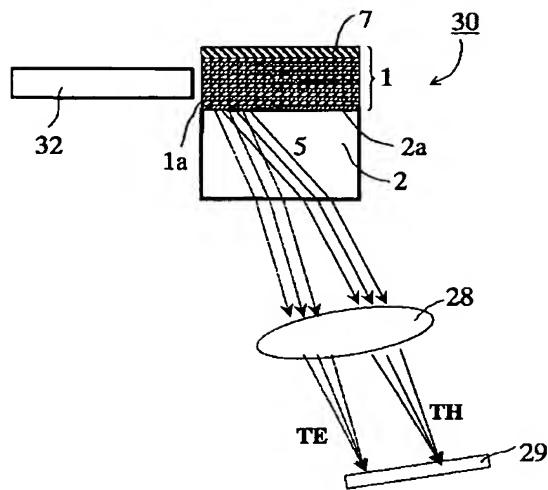
【図8】



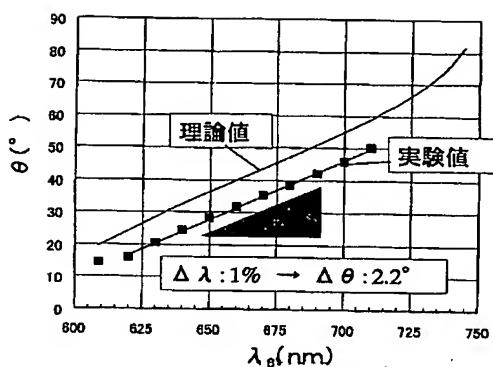
【図9】



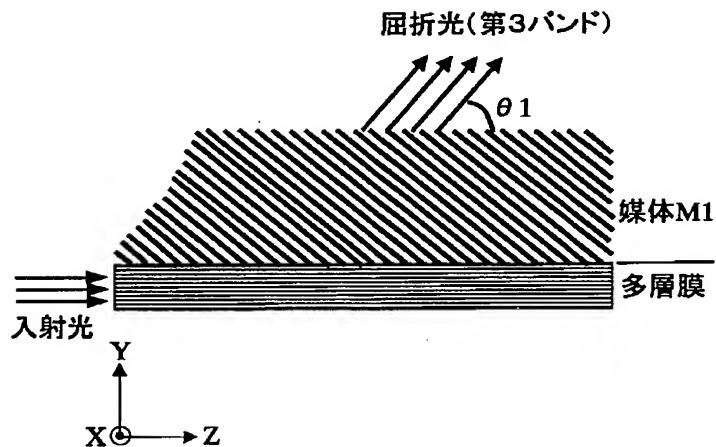
【図10】



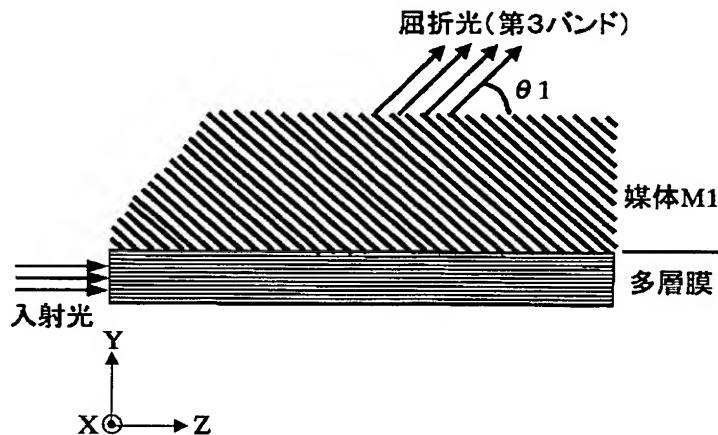
【図13】



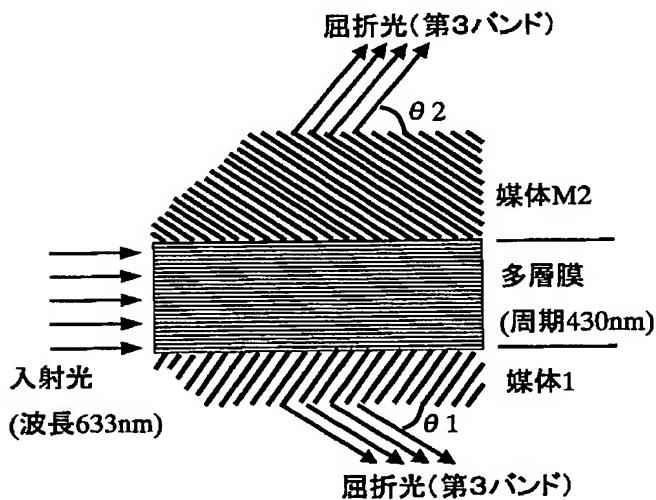
【図14】



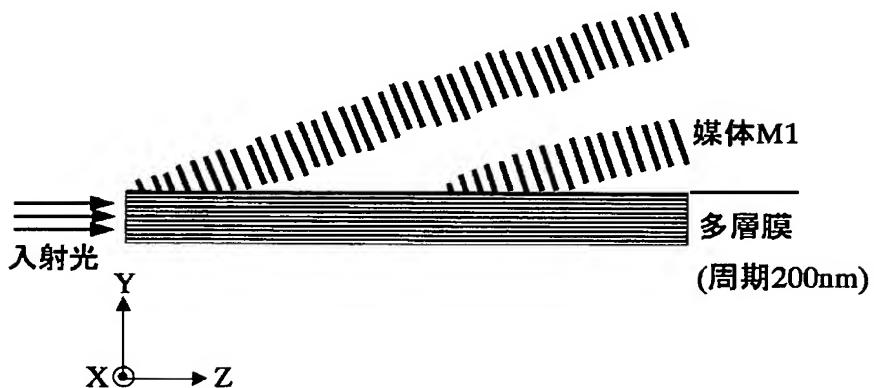
【図15】



【図16】



【図17】



フロントページの続き

(51) Int.C1.7

識別記号

F I
G 0 2 B 6/28

テーマコード(参考)
B

(72)発明者 中澤 達洋

大阪府大阪市中央区北浜四丁目7番28号
日本板硝子株式会社内

(72)発明者 小山 正

大阪府大阪市中央区北浜四丁目7番28号
日本板硝子株式会社内

(72)発明者 浅井 貴弘

大阪府大阪市中央区北浜四丁目7番28号
日本板硝子株式会社内

F ターム(参考) 2G020 AA03 BA20 CA15 CA17 CB32
CC13 CC14 CC15 CD24
2H047 KA02 MA03 RA02
2H049 BA05 BA42 BC23 BC25
2H099 BA17 CA00 DA05